

岩土边坡稳定性分析方法及工程应用研究

徐林蒙, 宋晓哲

(山东同信仁和地理信息科技有限公司, 山东 济南 250101)

摘要 边坡失稳是岩土工程建设中常见的灾害隐患, 做好边坡稳定性分析至关重要。本文在梳理极限平衡分析法、数值分析法、可靠度分析法等常用边坡分析方法特点和适用条件的基础上, 结合某高边坡和某深基坑支护工程实例, 对各类方法的工程应用效果进行对比分析。极限平衡分析法计算简便、工程经验丰富, 适用于一般均质边坡; 数值分析法能模拟复杂条件, 适用于重要边坡但对计算机水平要求高; 可靠度分析法能定量评价边坡安全风险, 是未来的重要发展方向。本文在此基础上提出应加强工程勘察、综合利用多种分析方法、重视可靠度分析、加强软硬件平台建设等建议, 以期对边坡稳定性分析提供参考。

关键词 岩土边坡; 稳定性分析; 极限平衡法; 数值分析法

中图分类号: TU43

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.18.038

0 引言

随着经济社会的快速发展, 各类岩土工程日益增多, 边坡失稳引发的滑坡、崩塌等地质灾害时有发生, 给国计民生造成重大损失。科学评价边坡稳定性, 采取有针对性地加固防护措施, 是确保工程安全的关键。常用的边坡稳定性分析方法主要包括极限平衡分析法、数值分析法和可靠度分析法等, 不同方法在计算原理、分析流程、适用条件等方面各具特点。在工程应用中应根据工程实际情况和稳定性分析的目的, 合理选择使用分析方法。因此, 有必要系统梳理各类分析方法的原理特点, 研究其工程应用效果, 以指导工程实践。

1 常用岩土边坡稳定性分析方法的特点与适用性

1.1 极限平衡分析法的特点与适用性

极限平衡分析法是以库伦准则为理论基础, 将滑动体简化为刚体, 列写各滑动块上的受力平衡方程, 求解边坡的最危险滑动面及其对应的稳定安全系数。其基本假定是边坡上存在贯通的滑动面, 土体处于极限平衡状态, 常用的极限平衡分析方法包括瑞典条分法、简化毕肖普法等, 其中瑞典条分法应用最为广泛。极限平衡分析法具有如下特点: (1) 模型简单, 计算过程直观, 可快速判断边坡的整体稳定性; (2) 参数容易获取, 工程中的经验丰富, 可靠性较高; (3) 不能考虑应力应变的连续变化, 难以模拟真实的土体破坏过程; (4) 忽略土体变形, 无法分析边坡的变形破坏模式。因此, 极限平衡法适用于土质均匀、地层结

构简单的一般性边坡分析, 对于重大边坡或复杂地质条件, 还需采用更高级的分析手段。

1.2 数值分析法的特点与适用性

数值分析法主要包括有限元法、有限差分法、边界元法和离散元法等。其中有限元法应用最广, 有限元法将边坡离散为若干单元, 基于最小势能原理建立单元的力学平衡方程, 引入本构模型描述土体的应力应变关系, 通过迭代求解得到边坡内部的位移、应力和应变分布, 进而判断其稳定性。离散元法将土体视为颗粒的集合体, 通过定义颗粒间的接触模型和运动定律, 模拟土体变形破坏全过程。

与极限平衡法相比, 数值分析法具有以下优点: (1) 能准确模拟土体内部的应力应变状态, 直观反映破坏发育过程; (2) 可考虑复杂的工程地质和水文地质条件, 以及外荷载、支护结构的影响; (3) 可获得位移、应力、应变等详细的计算结果, 评价边坡整体和局部的稳定性; (4) 可用于指导支护结构的优化设计与施工控制, 但数值分析对计算机软硬件要求较高, 计算量大, 生成模型和确定参数的难度大, 仍需大量工程对比验证。因此, 数值分析法主要用于重大工程和复杂边坡的精细化分析。

1.3 可靠度分析法的特点与适用性

由于工程地质条件和土体力学参数具有较大的空间变异性和随机不确定性, 传统的确定性分析方法难以全面反映边坡的安全状况。近年来边坡可靠度分析受到广泛关注, 可靠度分析引入概率统计理论, 将边

坡失稳视为随机事件,通过概率分布函数描述不确定参数,建立功能函数反映结构在随机参数作用下的响应,并用可靠度指标定量评价结构的安全程度,在此基础上可进一步开展边坡失稳风险评估和风险管控决策。边坡可靠度分析法的优点:(1)考虑了边坡岩土体及外荷载等因素的随机不确定性,分析结果更符合边坡失稳的客观规律;(2)定量评价边坡失稳概率,直观反映边坡安全风险;(3)可用于指导边坡加固防护的方案优化和安全预警。但该方法尚处于发展完善阶段,工程应用实例不多,参数的概率分布模型有待进一步探索,计算方法有待改进,在工程中的推广应用还需一个过程。

2 岩土边坡稳定性典型工程案例

某高边坡位于山区公路旁,岩性为泥质粉砂岩,边坡高度约 60 m,坡度 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$,稳定性直接影响公路安全,极限平衡分析得到边坡最小稳定安全系数为 1.28,位于小号和中号之间,表明其稳定性不高,采用有限元法计算,在自重和交通荷载作用下,坡顶位移 4~6 cm,坡脚位移 1~2 cm,坡体局部出现拉应力区,最大拉应力 0.2 MPa。整体变形呈前倾趋势,可能沿内部软弱层或陡倾节理面发生滑移,可靠度分析结果表明,边坡失稳概率为 4.7%,根据可靠度指标分级,边坡可靠度为三级,需采取工程措施消除安全隐患,最终通过架设锚索网格梁、修筑挡土墙、设置排水沟等措施对边坡进行综合治理,治理后边坡整体位移和拉应力明显降低,稳定安全系数提升到 1.51,失稳概率降至 0.8%,边坡长期稳定。

某深基坑支护工程位于软土地区,基坑开挖深度 12 m,采用放坡开挖和钢筋混凝土排桩支护,稳定性直接关系基坑周边建筑物和地下管线安全,事先采用极限平衡法计算支护结构内力和整体稳定性,并辅以有限元数值模拟。优化确定了支护方案,支护过程中,基坑各侧壁和周边环境变形均在控制值内,满足规范要求,基坑开挖后,采用可靠度分析评价支护体系安全水平。结果表明,基坑整体失稳概率仅为 0.2%,局部失稳概率为 1.6%,根据可靠度指标分级,均达到一级标准,为进一步降低风险,在支护桩间增设预应力锚索,在基坑周边布设自动化监测系统,实现变形实时预警。

上述案例表明,极限平衡法、数值分析法、可靠度分析法在工程应用中各具特色,极限平衡法计算简便,可快速评价边坡整体稳定性,适用于初步设计阶段。数值分析法可考虑复杂因素,模拟真实的土体破坏过

程,适用于重要边坡的精细化分析与防治设计。可靠度分析法能定量评价边坡失稳风险,是安全预警和风险管控的重要手段。工程实践中,应根据边坡复杂程度和稳定性分析的目的,合理选择使用,对于一般常规边坡,以极限平衡法为主,必要时数值模拟验证;对于重大边坡工程,宜采用极限平衡法、数值分析法、可靠度分析法相结合,相互验证,并在施工全过程开展动态分析^[1]。

3 岩土边坡稳定性分析方法在工程中的应用建议

3.1 加强工程地质勘察,提高边坡建模精度

边坡稳定性分析是岩土工程设计和施工的重要内容,其分析结果的可靠性在很大程度上取决于所建立的计算模型能否真实反映工程实际,而建立合理的计算模型,需要对边坡的工程地质条件有全面细致地了解。在边坡工程设计和施工的早期阶段,应高度重视工程地质勘察工作,采用各种先进可靠的勘探手段,如钻探、物探、探槽、原位测试等,并辅以室内土工试验,全面查明边坡的地层岩性、地质构造、水文地质条件、岩土体的物理力学性质等,尤其是对边坡稳定性起控制作用的薄弱夹层、软弱插层、节理裂隙等空间展布规律,以及地下水的赋存条件和运移规律,更应查明落实^[2]。在勘探过程中,要本着“点一线一面一体”相结合的原则,合理布置勘探点,并随着勘探工作的深入,对已有的地质认识不断修正完善,力求构建出精度高、可靠性强的三维工程地质模型。在此基础上,还要进一步简化成数学力学模型,这就需要在保证地质模型主要特征的前提下,运用一定的数学方法如分层、分区等,将地质条件相近的岩土体划归为同一计算单元,计算单元内部假定为均质体,并赋予相应的物理力学参数。

3.2 综合运用多种分析方法,相互校核印证

由于边坡问题的复杂性,以及认识和处理边坡问题的理论与方法的多样性,目前工程界普遍倾向于在边坡稳定性分析中综合采用多种方法。通过不同方法的优势互补和结果互验,以提高边坡稳定性评价的可靠性,常用的边坡稳定性分析方法主要包括极限平衡法、数值分析法和可靠度分析法等。其中,极限平衡法假定边坡土体处于破坏临界状态,通过各种简化假设条件,采用平衡计算求解安全系数;该方法计算简便、工程经验丰富,适用于分析边坡的整体稳定性,但难以模拟土体的应力应变变化过程。数值分析法如有限元法、离散元法等,在满足应力平衡方程和变形协调

方程的基础上,利用本构模型描述土体的真实应力—应变关系,通过数值迭代模拟边坡变形至破坏的完整过程,该方法可获得详细的变形、应力、应变等信息,模拟复杂地质情况,但计算量大,对计算机性能要求较高。可靠度分析法考虑了边坡岩土体性质的随机性和不确定性,基于概率统计理论,定量描述边坡失稳概率,能较全面地评价边坡的安全状态和风险水平。但目前计算模型有待进一步完善,对于一般性边坡,常采用极限平衡法进行初步分析;对于复杂或重要边坡,则应在极限平衡分析的基础上,辅以数值模拟验算,并用可靠度分析估计边坡失稳概率,若多种方法的计算结果能够相互印证,可大大增强分析结论的可信度;若结果差异较大,则需要通过反复调整模型和参数,进一步核实原始数据的代表性和计算方法的适用性,直至获得趋于一致的计算结果^[3]。

3.3 加强分析结果的可靠性评价与风险管控

边坡失稳是一个涉及诸多随机不确定因素的复杂问题,各种影响因素如岩土物理力学性质、水文地质条件、外荷载扰动等,都具有明显的空间变异性 and 随机不确定性,导致采用传统的确定性分析方法难以准确评估边坡的安全状态。

近年来,随着可靠度理论在岩土工程领域的广泛应用,边坡可靠度分析日益受到重视,可靠度分析法基于概率统计理论,用概率分布函数定量描述各不确定参数,建立功能函数反映结构在随机参数作用下的响应,并用可靠度指标量化结构的安全程度,将可靠度理论引入边坡稳定性分析,能够克服确定性分析的局限性,更加全面、合理地评价边坡的安全状态。在实际工程中,可结合边坡失稳的严重性和破坏后果,对边坡的安全等级进行划分,如高风险、较高风险、低风险等,在此基础上分别采取不同的风险控制措施,对于高风险边坡,要高度重视。在设计阶段进行专门的可靠度分析,科学论证其安全性;施工阶段严格按设计要求施工,加强过程监控,及时优化设计和施工措施;运营阶段还应建立健全的安全监测系统,布设各类监测仪器实时监测边坡变形,及早发现险情并及时预警和处置,对于较高风险边坡,虽然整体破坏可能性不大。但局部失稳的概率较高,应重点做好应急预案,一旦发生险情能够及时、有序地组织抢险,最大限度减小灾害损失,对于低风险边坡,虽然发生失稳的可能性很小,但也不可掉以轻心,应做好定期安全巡查和检测工作,发现问题及时处理^[4]。

3.4 注重软硬件平台建设,提升分析效率与适用性

随着现代科学技术的飞速发展,大型复杂边坡数值分析对计算机软硬件系统的要求越来越高。随着有限元、离散元等数值分析理论的不完善,边坡计算模型更加精细、计算规模不断扩大,对计算机的存储容量、运算速度、稳定性等提出了更高要求,为了更好地模拟边坡的真实变形破坏过程,计算模型需要考虑越来越多的影响因素,如岩土的非线性特征、接触面特性、动力荷载、水力耦合作用等,导致计算过程异常复杂,对相关软件系统的适用性、可扩展性、人机交互性等提出了更高要求。为了满足日益增长的计算分析需求,工程界和学术界应加强软硬件平台的研发与集成,着力提升边坡分析的计算效率、适用范围和分析精度,硬件方面,可构建高性能计算集群环境,采用CPU/GPU异构计算架构,研究大规模并行计算方法,最大限度发挥计算机的性能优势,软件方面,要开发功能完备、体系开放的通用有限元、离散元软件平台,集成前后处理、并行计算、智能网格划分、自适应网格加密等先进技术,实现从地质建模、计算分析到结果可视化的一体化集成,简化操作流程,提高分析效率^[5]。

4 结束语

岩土边坡失稳是一个世界性难题,我国不同区域普遍存在各种类型的边坡工程,如何加强边坡稳定性分析,指导边坡治理设计施工,确保其安全性、经济性,是当前岩土工程面临的重要课题。未来,随着岩土工程科学的不断发展和计算机技术的日益进步,边坡稳定性分析理论和方法必将更加科学完善,为工程建设提供更加精准高效的技术支撑。

参考文献:

- [1] 周海波,曾诚,李兵,等.基于岩土结构的高边坡稳定性评价与处治技术研究[J].工程建设与设计,2025(02):16-18.
- [2] 姜涛.岩土工程中边坡稳定性分析与加固技术研究[J].新城建科技,2024,33(08):124-126.
- [3] 黎德波.岩土工程勘察中赤平投影判断边坡稳定性分析的应用[J].冶金与材料,2023,43(05):178-180.
- [4] 师欢欢,张兴.深基坑岩土工程边坡稳定性评价方法创新设计与应用[J].工程技术研究,2023,08(01):55-57,61.
- [5] 魏小涛,林坚,罗财金.岩土工程中边坡稳定性分析及检测方法研究[J].粘接,2022,49(03):109-112.